



⑬ **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 197 46 138 A 1**

⑤ Int. Cl.⁶:
G 01 R 33/12
H 01 L 29/82
H 01 F 10/00
// G11C 11/22

⑦ Aktenzeichen: 197 46 138.7
② Anmeldetag: 18. 10. 97
④ Offenlegungstag: 22. 4. 99

DE 197 46 138 A 1

⑦ Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦ Erfinder:
Schmidt, Georg Dr., 52072 Aachen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤ Verfahren zum Detektieren eines Stroms spinpolarisierter Elektronen in einem Festkörper

⑤ Es wird ein Verfahren zum Detektieren der Polarisationsrichtung eines durch Injektion aus einem magnetisierten ferromagnetischen Kontaktkörper in einen nicht ferromagnetischen Festkörper erzeugten Stroms spinpolarisierter Elektronen beschrieben. Um den Prozeßaufwand zu vermindern, die Bauelemente mit kleinerer Dimension als bisher herstellen zu können, Analysekontakte oder Magnetfeldsensoren nicht zu benötigen und eine vom Elektronenstrom unabhängige Meßspannung für die Polarisationsrichtung zu erhalten, wird in dem Festkörper ein das jeweils injizierte Elektron abhängig von seinem durch den Spin erzeugten magnetischen Moment ablenkendes inhomogenes Magnetfeld erzeugt und das durch diese magnetische Ablenkung der Elektronen aufgebaute elektrische Feld wird als Spannung gemessen.

DE 197 46 138 A 1

BEST AVAILABLE COPY

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Detektieren der überwiegenden Polarisationsrichtung eines durch Injektion aus einem magnetisierten ferromagnetischen Kontaktkörper eines nicht ferromagnetischen Festkörpers in letzterem erzeugten Stroms spinpolarisierter Elektronen. Sie betrifft ferner eine Vorrichtung zum Durchführen des Verfahrens.

Das Verfahren und die Vorrichtung sind bevorzugt zur Anwendung in der Magnetspeichertechnik vorgesehen. In der Magnetspeichertechnik können äußerst hohe Speicherdichten erreicht werden: Magnetspeicher sind nicht flüchtig. Zum Schreiben muß lediglich die Magnetisierung durch Anlegen eines externen Magnetfeldes geändert werden. Schwierigkeiten bereitet jedoch der elektronische Auslesevorgang bei Magnetspeichern.

Ein ferromagnetisches Partikel, das eine Hysterese und ein endliches Koerzitivfeld aufweist, kann in Form seiner Magnetisierungsrichtung eine Information speichern. Dabei bedeutet die Speicherung eines Bits eine Magnetisierung entweder parallel oder antiparallel zu einer vorgegebenen Raumrichtung; es handelt sich hierbei um die sogenannte Magnetspeichertechnologie. Ein Partikel, das ein Bit speichert, kann prinzipiell vollständig in eine Richtung magnetisiert sein. Abhängig von der Zustandsdichte (Material) bedeutet dies jedoch keine 100% Spinpolarisation der Leitungselektronen. Prinzipiell kann die Spinpolarisation der Leitungselektronen sogar umgekehrt sein. Daher wird von einer "überwiegenden" Polarisationsrichtung gesprochen. Wichtig ist nur, daß im allgemeinen ein wie auch immer gearteter Bezug zwischen Magnetisierereinrichtung und Polarisierung der Leitungselektronen besteht.

Die Elektronen in einem ferromagnetischen Material weisen abhängig von der Ausrichtung des Elektronenspins eine unterschiedliche Zustandsdichte auf. Unterscheidet sich diese Zustandsdichte an der Fermikante, so besitzen die Elektronen, die einen Strom transportieren, eine Vorzugs-
spinausrichtung entsprechend der Magnetisierung. Ebenso finden Elektronen, die von einem anderen Material in einen Ferromagneten eintreten, eine unterschiedliche Anzahl freier Zustände je nach Ausrichtung ihres Spins vor.

Nach US-PS 54 32 373 (Johnson 373) kann bei Stromfluß aus einem Ferromagneten in einen Nichtferromagneten die Spinpolarisation der Elektronen über einen gewissen Abstand zum jeweiligen Kontakt erhalten bleiben. Eine Anordnung, die im Bekannten hierfür angenommen wird, besteht aus einem ferromagnetischen Metallkontakt auf einem nicht ferromagnetischen leitenden oder halbleitenden Festkörper.

Hierbei wird ausgenutzt, daß die Spinpolarisation der Leitungselektronen beim Übergang aus dem ferromagnetischen Kontaktmaterial in das nicht ferromagnetische Festkörpermaterial erhalten bleibt und dort einen spinpolarisierten Strom erzeugt. Im folgenden wird dies als Injektion bezeichnet. Die Spinpolarisation der Elektronen bleibt über eine gewisse material- und temperaturabhängige Distanz erhalten. Da die meisten Streumechanismen für Elektronen deren Spin nicht direkt beeinflussen, ist davon auszugehen, daß die Spinrelaxationslänge deutlich größer ist als die mittlere freie Weglänge für Elektronen. Ein elektronisches Ausleseverfahren einer in dem jeweiligen ferromagnetischen Kontakt gespeicherten Information kann also darin bestehen, die Spinpolarisation des Stroms zu detektieren.

Eine aus US-PS 56 54 566 (Johnson 566) bekannte Methode zum Detektieren der Spinpolarisation der aus dem ferromagnetischen Kontakt in den leitenden oder halbleitenden Festkörper injizierten Elektronen erfordert einen zweiten ferromagnetischen Kontakt an dem Festkörper. Es wird hierbei angenommen, daß die Eigenschaften des zweiten

Kontakts je nach Ausrichtung seiner Magnetisierung relativ zur Spinpolarisation des Stroms variieren. Grund hierfür soll die unterschiedliche Zustandsdichte für beide Spinausrichtungen im Ferromagneten sein, die eine spinabhängige Eintrittswahrscheinlichkeit für die ankommenden, spinpolarisierten Elektronen bewirken soll. Die Zustandsdichte im Halbleiter ist jedoch im Vergleich zu den Zustandsdichten in den ferromagnetischen Kontakten so gering, daß die Spinselektivität unmeßbar klein wird; tatsächlich finden alle Elektronen aus dem Halbleiter einen freien Zustand im ferromagnetischen Kontakt.

Wenn man den zweiten ferromagnetischen Kontakt durch eine Tunnelbarriere vom ersten Ferromagneten trennt, wird die Spinselektivität wieder hergestellt. In diesem Fall sind aber ein hoher Widerstand und erhebliche Herstellungsprobleme betreffend die Tunnelbarrieren, die üblicherweise aus einem Oxid von wenigen Nanometern Dicke bestehen und keine Defekte aufweisen dürfen, in Kauf zu nehmen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Detektieren der Spinpolarisation des aus einem magnetisierten ferromagnetischen Kontaktkörper in einen nicht ferromagnetischen Festkörper injizierten Stroms spinpolarisierter Elektronen zu schaffen, bei dem die vorbeschriebenen Nachteile vermieden werden. Es wird also nach einem neuen Meßprinzip gesucht, das es erlaubt, die Spinpolarisation unmittelbar zu erfassen, das technologisch sinnvolle Ein- und Ausgangswiderstände erreicht, Tunnelbarrieren oder dergleichen schwierig herzustellende Hilfsmittel nicht benötigt und eine möglichst geringe Empfindlichkeit gegenüber Drift-, Offset- und Rauschspannungen besitzt, so daß ein entsprechend ausgebildetes Bauelement als nicht flüchtige Speicherstelle für die Informationsmenge 1 Bit bei im Verhältnis zu herkömmlichen, auf Silizium basierenden dynamischen Speichern (DRAM) hoher Integrationsdichte zu nutzen ist. Prinzipiell soll zwar nur ein Vorteil gegenüber den nicht flüchtigen Speichern Flash-Ram, EPROM, EEPROM, erreicht werden. Im Rahmen der Aufgabe wäre es aber ein weiterer Fortschritt, wenn zusätzlich auch noch die flüchtigen dynamischen Speicher durch nicht flüchtige Speicher ersetzt werden können. Die Eingangs- und Ausgangswiderstände sollten kompatibel zur herkömmlichen Technologie (CMOS) sein.

Die erfindungsgemäße Lösung besteht für das eingangs genannte Verfahren darin, daß in dem Festkörper ein das jeweils injizierte Elektron abhängig von seinem durch den Spin erzeugten magnetischen Moment ablenkendes inhomogenes Magnetfeld erzeugt wird und daß das durch diese magnetische Ablenkung der spinpolarisierten Elektronen aufgebaute elektrische Feld als Spannung detektiert wird; letzteres soll mit anderen Worten bevorzugt heißen, daß das Integral des elektrischen Feldes als Spannung zwischen zwei Kontakten bestimmt wird.

Bei einer bevorzugten Vorrichtung zum Durchführen dieses Verfahrens werden an den Festkörper mindestens ein die spinpolarisierten Elektronen injizierender ferromagnetischer Kontaktkörper (bzw. Injektorkontakt), mindestens ein das inhomogene Magnetfeld erzeugender Ferromagnet und mindestens ein elektrischer Kontakt zum Erfassen des elektrischen Feldes vorgesehen. Vorzugsweise bedeutet das, daß mindestens ein Injektor und ein zweiter Kontakt zum Stromeinprägen und mindestens ein Ferromagnet und zwei Kontakte zur Erfassung des Feldes, von denen einer den Magneten beinhalten kann, gebraucht werden. "Ferromagnet" steht hierbei für jedes Mittel, das in der Lage ist, die erforderlichen Magnetfelder mit der extremen Inhomogenität zu erzeugen und aufrechtzuerhalten. Einige Verbesserungen und weitere Ausgestaltungen der Erfindung werden in den Unteransprüchen angegeben.

Die Erfindung schlägt ein Meßverfahren vor, das von den bisher verwendeten Verfahren im Grundsatz abweicht. Die üblichen Effekte eines Magnetfelds auf Elektronen in einem Festkörper, insbesondere Halbleiter, lassen sich mit den Stichwörtern Magnetowiderstand und Halleffekt zusammenfassen. Beide Effekte sind in erster Näherung vom Elektronenspin unabhängig. Sie beruhen auf der Lorentzkraft, die eine Ablenkung bewegter Elektronen in einer Richtung senkrecht zu der aus Strom- und Magnetfeldrichtung aufgespannten Ebene bewirkt. Betrachtet man zusätzlich die Magnetfeldwirkung auf den spinpolarisierten Transport, so wird in der Literatur einzig die Präzession des Elektronenfeldes im externen homogenen Magnetfeld erwähnt; vgl. A. G. Aronow, G. L. Pikus, Spin injection into semiconductors, Sov. Phys. Semicond. 10, 6, (1976), 698-700.

Erfindungsgemäß wird eine andere Kraft, nämlich eine Kraft, die es erlaubt, spinpolarisierte Elektronen zu beschleunigen bzw. abzulenken, genutzt. Diese Kraft wurde 1921 im sogenannten Stern-Gerlach-Versuch beim Nachweis der Spinquantisierung von Silberatomen in einem stark inhomogenen Magnetfeld entdeckt (vgl. Lehrbücher der Physik).

Die erfindungsgemäße Übertragung der für nicht geladene Teilchen konzipierten Idee des Stern-Gerlach-Versuchs auf geladene Teilchen, nämlich Elektronen, die aufgrund eines quantisierten Spins ein magnetisches Moment aufweisen, führt dazu, daß auf das in den Festkörper injizierte spinpolarisierte Elektron in einem mit einem Gradienten behafteten Magnetfeld B aufgrund des magnetischen Moments M die Kraft $F = M \cdot \nabla B$ wirkt.

Diese Kraft, die dem erfindungsgemäß zu detektierenden elektrischen Feld bzw. dem lokalen Gradienten der Spannung proportional ist, bewirkt eine zur Beschleunigung und Auslenkung des spinpolarisierten Elektronenstroms (also anders als bei der Lorentzkraft) innerhalb der Strom/Magnetfeld-Ebene in Richtung des B -Feldgradienten. Die erfindungsgemäß angewendete das einzelne Elektron ablenkende Kraft F ist auch nur abhängig vom Gradienten des Magnetfeldes und vom magnetischen Moment des Elektrons. Diese Kraft ist dagegen unabhängig von der Größe des (Elektronen-)Stroms. Der Polarisationsgrad und Strom bestimmen über die Zahl der spinpolarisierten Elektronen nur den Ausgangswiderstand.

Einige weitere Vorteile der Erfindung bestehen darin, daß ein Analysekontakt und ein Magnetfeldsensor nicht erforderlich sind, und vor allem, daß bei Einsatz üblicher Herstellungsverfahren eine Speicherstelle mit weniger Prozeßaufwand und mit deutlich kleinerer Dimension als bisher herzustellen ist. Beispielsweise läßt sich das externe Magnetfeld eines sehr kleinen ferromagnetischen Partikels an der Partikeloberfläche aufgrund der Stetigkeitsbedingungen so hoch wie die Magnetisierung des Partikels machen, es kann also im Bereich von 1 bis 2 Tesla liegen. In geringem Abstand von der Partikeloberfläche nimmt das (dort inhomogene) Magnetfeld extrem schnell ab. Ein Partikel von etwa 300 nm Durchmesser erzeugt in einem Abstand von 1 Mikrometer quasi kein Feld mehr. Das externe Magnetfeld weist daher nahe der Partikeloberfläche innerhalb z. B. 500 nm - einen extrem hohen Gradienten auf, der eine Größenordnung von 10^7 T/m erreichen kann. Bevorzugt sollen im Rahmen der Erfindung die Miniaturisierungsmaßstäben entsprechend kleine ferromagnetische Partikel mit Durchmesser kleiner als 500 nm, insbesondere kleiner als 200 nm, eingesetzt werden. Die Partikel können, wenn möglich, noch kleiner sein. Angestrebt werden derzeit Durchmesser von 100 nm und weniger.

Im Rahmen der Erfindung kann der Festkörper aus Halbleiternmaterial oder einem leitendem nicht ferromagnetischen

Material bestehen, besonders bevorzugt als Material wird Silizium. Ein zum Erzeugen des inhomogenen Magnetfeldes vorgesehener ferromagnetischer Kontakt soll quer zur mittleren Injektionsrichtung der spinpolarisierten Elektronen und parallel zur Oberfläche des die Elektronen führenden Festkörpers magnetisiert werden. Dem magnetisierten ferromagnetischen Kontaktkörper - auch Injektorkontakt - insgesamt kann ein nicht ferromagnetischer aber auch ein zweiter ferromagnetischer Kontaktkörper auf einer gegenüberliegenden Kante des Festkörpers zugeordnet werden.

Die Erfindung wird einschließlich weiterer Ausgestaltungen und Verbesserungen teilweise unter Bezugnahme auf die beiliegende Zeichnung noch näher erläutert. Dabei zeigen:

Fig. 1 eine perspektivische Ansicht einer erfindungsgemäß ausgebildeten Speicherzelle mit einem Injektorkontakt;

Fig. 2 und 3 den Mechanismus von Fig. 1 bei parallelen oder antiparalleler Ausrichtung von Spinpolarisation und Magnetfeld;

Fig. 4 und 5 den Mechanismus wie bei Fig. 2 und 3, jedoch mit einer Zelle mit zwei Injektorkontakten;

Fig. 6 eine planare Version der Speicherzelle nach Fig. 1;

Fig. 7 den Verlauf des (inhomogenen) Magnetfeldes nach Fig. 6; und

Fig. 8 eine Speichermatrix mit einer Vielzahl von Bauelementen nach Fig. 1 oder 6.

In der in Fig. 1 gezeigten Anordnung befinden sich auf einander gegenüberliegenden Kanten eines aus Halbleitermaterial, vorzugsweise Silizium, bestehenden Festkörpers 1 ein ferromagnetischer Kontaktkörper 2 - das ist in Fig. 1 ein sogenannter Injektorkontakt - und ein nicht ferromagnetischer Kontaktkörper 3, der in Fig. 1 nur zur Streueinprägung dient. An die beiden anderen Festkörperkanten grenzen ein ferromagnetischer Kontakt 4 zur Ablenkung und Spannungsmessung und ein nicht ferromagnetischer Kontakt 5 zur Spannungsmessung an.

Der ferromagnetische Kontaktkörper 2 soll parallel zur Oberfläche des Festkörpers 1 und quer zur Verbindungslinie der Kontaktkörper 2, 3, also der mittleren Stromrichtung 6, magnetisiert sein. Die Magnetisierungsrichtung in dem Körper 2 wird mit 7 bezeichnet. Zwischen den Kontaktkörpern 2 und 3 sollen Elektronen 8 im Mittel längs der Stromrichtung 6 fließen. Die Elektronen 8 sollen zu einem bestimmten Prozentsatz spinpolarisiert sein. Diese Spinpolarisation 9 entspricht von der Richtung her der Magnetisierungsrichtung 7 des Kontaktkörpers 2 oder ist ihr entgegengesetzt, je nachdem wie die Spinpolarisation die Leitungselektronen mit der Magnetisierung verknüpft ist.

Im folgenden bezeichnet die Stromrichtung 6 die Bewegungsrichtung der injizierten spinpolarisierten Elektronen. Ein Strom vom Kontaktkörper 2 zum Kontaktkörper 3 durch den Festkörper 1 wird entsprechend der durch die Magnetisierung des Kontaktkörpers 2 bestimmten unterschiedlichen Zustandsdichte für die verschiedenen Spinrichtungen spinpolarisiert. Durch das inhomogene Magnetfeld des Kontakts 4 wirkt eine Kraft auf die spinpolarisierten Elektronen 8. Durch die Kraft kommt es zu einer Ladungstrennung, die eine Spannung U zwischen den Kontakten 4 und 5 erzeugt. Diese Spannung wechselt ihr Vorzeichen, je nachdem ob die (resultierende) Kraft anziehend oder abstoßend ist.

Wird der Festkörper 1 als rechteckig symbolisiert, sitzen die Kontaktkörper 2 und 3 auf den Festkörperkanten 10 bzw. 11 und die Kontakte 4 und 5 grenzen an die Kanten 12 bzw. 13. Die Magnetisierung 14 des Kontakts 4 soll nach Fig. 1 in Richtung auf den anderen Kontakt 5 verlaufen. Diese Richtung wird als x -Richtung bezeichnet. Der Kontakt 4 bzw. dessen Anschluß an den Festkörper 1 befindet sich bei $x = 0$.

der Kontakt 5 (bzw. dessen Anschlußstelle an den Festkörper 1) befindet sich bei $x = d$, wenn d der Abstand der gegenüberliegenden Kanten 12 und 13 des Festkörpers 1 ist.

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird in Fig. 1 ein B-Feld 14 in Plus- x -Richtung angenommen. Die Abmessungen des Kontaktes 4 und dessen Form werden so gewählt, daß das externe Magnetfeld in Plus- x -Richtung den bereits beschriebenen hohen B-Gradienten aufweist. Auf die spinpolarisierten Elektronen 8, die sich von dem Kontaktkörper 2 in Richtung auf den Kontaktkörper 3 durch den Festkörper 1 bewegen, wirkt eine Kraft F aufgrund des durch den Elektronen-Spin erzeugten magnetischen Moments und des Magnetfeldgradienten.

Dadurch werden die Elektronen 8 abgelenkt, wobei die hierdurch erfolgende Ladungstrennung aufgrund der ungleichen Verteilung der verschiedenen magnetischen Momente ein (der Auslenkung entgegenwirkendes) elektrisches Feld E aufbaut. Dieses elektrische Feld hat die Größe $E = 1/e \cdot M \cdot \nabla B$.

Zwischen den beiden Kontakten 4 und 5 liegt daher eine Spannung U , die dem Integral über das elektrische Feld E von 4 nach 5 entspricht. Ist das Magnetfeld B vom Kontakt 4 ($x = 0$) bis zum Kontakt 5 ($x = d$) auf Null abgefallen, so ergibt das Integral $U = 1/e \cdot M \cdot B$.

Diese Spannung kann je nach Betrag der Magnetisierung des Kontakts 4 im Bereich zwischen 100 Mikrovolt und 1 Millivolt liegen. Die Spannung U ist, wie aus der letzten Formel ersichtlich ist (ganz im Gegensatz zur spinunabhängigen Hallspannung) nicht vom Strom zwischen den Kontaktkörpern 2 und 3 abhängig. Der Strom bestimmt einzig den Ausgangswiderstand des Bauelements bzw. Speicherelements. Das Bauelement kann also an bestehende Schaltungen angepaßt werden. Wenn die Spannung U mit den gesonderten Kontakten 4 und 5 gemessen wird, steckt die erfindungsgemäße Information über die Spinpolarisation nicht im Spannungspegel, sondern allein im Vorzeichen.

Fig. 2 zeigt ein Beispiel für Aufbau und Funktion eines erfindungsgemäßen Bauelements bei paralleler Ausrichtung von Spinpolarisation 9 und ablenkendem (inhomogenen) Magnetfeld 14. Zwischen die Kontaktkörper 2 und 3 wird eine Spannungsquelle 15 gelegt, die gesuchte Spannung U zwischen den Kontakten 4 und 5 wird an dem Meßgerät 16 abgelesen.

In Fig. 3 wird ein ähnlicher Aufbau wie in Fig. 2 dargestellt. Der Unterschied besteht im wesentlichen darin, daß die Spinpolarisation 9 der Elektronen 8 antiparallel zum Magnetfeld 14 liegt.

Die Spinpolarisation des Elektronenstroms wird durch den Injektorkontakt vorgegeben. Werden jedoch die Kontaktkörper 2 und 3 identisch ausgelegt, so können durch Umkehr der Stromrichtung wahlweise die Kontaktkörper 2 oder 3 ausgelesen werden. In diesem Fall verdoppelt sich die Integrationsdichte. In Fig. 4 und 5 werden ähnliche Verhältnisse wie bei Fig. 2 und 3 dargestellt; jedoch wird vorgesehen, daß beide Kontaktkörper 2 und 3 ferromagnetisch sind und als Speicher einer Polarisations-Information dienen können. Es ist dann – wie dargestellt – möglich, an ein und demselben Bauelement zwei Injektorkontakte (2, 3) durch Umkehrung der Stromrichtung 6 bzw. Umpolung der Spannungsquelle 15 auszulesen.

Ein erfindungsgemäßes Bauelement kann, wie gesagt, als Speicherstelle bzw. Speicherelement für die Informationsmenge 1 Bit genutzt werden, wobei eine sehr hohe Integration zu erreichen ist. Die Miniaturisierung kann wesentlich weiter als bei herkömmlichen DRAMs getrieben werden.

Die jeweils gespeicherte Information kann wahlweise im Kontaktkörper 2 oder im Kontakt 4 gespeichert werden, wobei zum Auslesen die Magnetisierungsrichtung des jeweils

anderen Kontakts bekannt sein muß. Im allgemeinen ist es aber günstig, den zum Speichern verwendeten ferromagnetischen Kontakt aus weichmagnetischem Material und den zum Erzeugen des stark inhomogenen Magnetfeldes benutzten Kontakt aus hartmagnetischem Material herzustellen.

In Fig. 6 wird eine planare Version der Anordnung von Fig. 1 dargestellt. Das aktive Gebiet, der Festkörper 1, wird z. B., insbesondere bei Verwendung von Halbleitermaterial, durch Ionenimplantation erzeugt. Nach Fig. 1 befinden sich die Kontakte 4 und 5 in der Ebene des Festkörpers 1, nach Fig. 6 befinden sich alle Kontakte 2, 3 und 4, 5 auf der Oberfläche des Festkörpers 1. Die Kontakte 4, 5, die das inhomogene B-Feld erzeugen sollen, werden nach Fig. 6 und 7 so dünn gemacht, daß Magnetfeld und Feldgradient an der Oberfläche (von 1) nahezu parallel zu dieser verlaufen. Diese Herstellungsweise ist kompatibel mit herkömmlicher Technologie.

Fig. 7 zeigt einen bevorzugten Verlauf des ablenkenden (inhomogenen) Magnetfeldes vor dem ablenkenden Kontakt 4 in der planaren Variante nach Fig. 6. Durch einen sehr dünnen Kontakt 4 verläuft der B-Gradient unmittelbar in bzw. an der Oberfläche des Festkörpers 1, insbesondere also des Halbleiterkörpers.

Gemäß weiterer Erfindung werden die Kontakte 4 und 5 beide als Ferromagneten ausgelegt. Bei beiden Kontakten 4 und 5 kann das B-Feld in die gleiche Richtung weisen, wenn nur der B-Gradient der Kontakte 4 und 5 entgegengesetzt ist. Wird dann der Abstand d der Kontakte 4 und 5 so gewählt, daß das Magnetfeld beider Kontakte in der Mitte ($x = d/2$) zwischen den Kontakten nahezu Null ist, so addieren sich die Spannungen, die durch die Feldgradienten erzeugt werden. Die Ausgangsspannung wird dadurch verdoppelt.

Falls eine technologische Inkompatibilität zwischen dem Material des Kontakts 4 und demjenigen des Festkörpers 1 bestehen sollte, kann der Kontakt 4 durch eine dünne, nicht ferromagnetische Metallschicht 17 vom Festkörper 1 getrennt werden, ohne die Funktion wesentlich zu beeinträchtigen. Ebenso muß der Injektormagnet 2 nicht notwendigerweise mit dem Halbleiter 1 direkten Kontakt haben. Es ist vorstellbar, daß zur Verbesserung der Kontakteigenschaften eine nicht ferromagnetische dünne Metallschicht eingebracht wird, wobei in dieser der Spin nicht – jedenfalls nicht störend – relaxieren darf.

Der Kontakt 5 kann im Prinzip auch ganz weggelassen werden. In diesem Fall wird die Spannung U zwischen den Kontakten 4 und 3 oder 4 und 2 gemessen, wobei jedoch mit Änderung der Spinpolarisation kein Vorzeichenwechsel, sondern nur eine Spannungsänderung auftritt. Diese Lösung ist zu bevorzugen, wenn eine ausreichend große Spannungsänderung auftritt und eine durch den Wegfall des einen Kontakts ermöglichte höhere Integrationsdichte erwünscht ist.

Bei Integration werden die einzelnen Bauelemente in einer Speichermatrix angeordnet. Hierbei verläuft in jeder Spalte und in jeder Zeile eine Leitung, wobei sich an dem umzumagnetisierenden Kontakt je eine Zeilen- oder Spaltenleitung überlagern. Das Magnetfeld, welches eine Zeilen- oder Spaltenleitung allein erzeugt, ist kleiner als das Koerzitivfeld eines Information speichernden Kontaktes. An der Stelle, an der sich das Feld einer Spalten- oder Zeilenleitung überlagern, wird die Koerzitivfeldstärke überschritten. Auf diese Weise können mit einer einfachen Ansteuerung die Kontakte selektiv ummagnetisiert (umgeschrieben) werden. Diese Zeilen- und Spaltenleitungen können auch zur Ansteuerung (Adressierung) der einzelnen Elemente und zum Auslesen genutzt werden.

Im Rahmen der Erfindung können mehrere Speicherelemente zusammengeschaltet werden, wobei jeweils Kontaktkörper 2 vom n -ten Element und Kontaktkörper 3 ($n + 1$)-

ten-Element verbunden werden. Bei Strom von Kontaktkörper 3 des ersten Elements der Kette zum Kontaktkörper 2 des letzten Elements der Kette liegen an allen Elementen der Kette die zugehörigen Ausgangsspannungen an. Diese können also parallel ausgelesen werden. Alternativ können mehrere Elemente zusammengeschaltet werden, wobei jeweils Kontakt 4 vom n-ten Element mit Kontakt 5 des (n + 1)-ten Element zu verbinden ist. Bei Ansteuerung des n-ten Bauelements der Kette über seine Kontaktkörper 2 und 3 liegt zwischen Kontakt 5 des ersten Elements und Kontakt 4 des letzten Elements die Ausgangsspannung des n-ten Elements an. Dadurch wird ein selektives Auslesen mit nur einer Ausgangssignalleitung ermöglicht.

Die vorgenannten Verkettungen können kombiniert werden, in dem die Kontaktkörper 2 und 3 beispielsweise in Spalten und die Kontaktkörper 4 und 5 in Reihen angeordnet werden. Es kann dann ein Strom durch eine Spalte eingeprägt und durch Auswahl einer Reihe ein einzelnes Element der Matrix gezielt ausgelesen werden. In diesem Fall benötigt man 2n-Leitungen um n^2 -Elemente zu adressieren. Bei dieser Matrix-Verkettung können die Kontakte 4 und 5 jeweils von zwei Bauelementen genutzt werden. Von der Funktionsweise her sollen dann die Kontakte 4 und 5 bei nebeneinanderliegenden Speicherelementen seitenvvertauscht angebracht werden. Die Zusammenfassung spart nicht nur Platz, sondern auch Material und Herstellungsaufwand. Eine entsprechende Verschaltung und Ansteuerung anderer Elemente in einer Matrix mit gemeinsamer Nutzung der Kontakte durch je zwei Elemente wird in Fig. 8 dargestellt.

Fig. 8 geht noch weiter. Es wird nämlich eine Variante mit zwei ablenkenden Magneten eingesetzt. Da ein Magnet von beiden Enden jeweils unterschiedlich aussieht, werden alle Elemente gleichsinnig betrieben. Zusätzlich sind alle Kontakte 2 und 3 Informationsträger. Sie dienen aber, je nachdem welches Element betrachtet wird, entweder als Injektor oder als zweiter Kontakt zum Stromeinprägen (hierbei stört die Magnetisierung nicht). Man hat also zwei Kontakte gespart, bzw. man nutzt die 2 Bit Variante, liest aber nicht durch Stromumkehr aus. Die einzelnen Zusammenhänge werden am besten aus der Zeichnung und den Bezugszeichen von Fig. 8 verständlich.

Bezugszeichenliste

- 1 Festkörper
- 2, 3 Kontaktkörper
- 4, 5 Kontakt
- 6 Elektronenstrom
- 7 Magnetisierung
- 8 Elektronen
- 9 Spinpolarisation
- 10-13 Kanten (1)
- 14 B-Feld
- 15 Spannungsquelle
- 16 Spannungsmessgerät
- 17 Metallschicht

Patentansprüche

1. Verfahren zum Detektieren der überwiegenden Polarisationsrichtung eines durch Injektion aus einem magnetisierten ferromagnetischen Kontaktkörper (2) eines nicht ferromagnetischen Festkörpers (1) in letzterem erzeugten Stroms spinpolarisierter Elektronen (8) **dadurch gekennzeichnet**, daß in dem Festkörper (1) ein das jeweils injizierte Elektron (8) abhängig von seinem durch den Spin erzeugten magnetischen Moment ablenkendes inhomogenes Magnetfeld erzeugt wird

und daß das durch diese magnetische Ablenkung der spinpolarisierten Elektronen (8) aufgebaute elektrische Feld als Spannung detektiert wird.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Injektion durch Anlegen einer Spannung zwischen dem ferromagnetischen Kontaktkörper (2) und einem weiteren Kontaktkörper (3) des Festkörpers (1) erfolgt.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der ferromagnetische Kontaktkörper (2) als Informationsträger bzw. Magnetspeicher magnetisiert wird.

4. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß das elektrische Feld als Spannung zwischen Kontakten (2, 4; 3, 4; 4, 5) des Festkörpers (1) gemessen wird.

5. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das elektrische Feld als Spannung zwischen zwei zusätzlich zu dem ferromagnetischen Kontaktkörper (2) vorgesehenen Kontakten (4, 5) des Festkörpers (1) in einer Richtung im wesentlichen quer zur mittleren Stromrichtung (6) der Elektronen (8) gemessen wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß nur die Richtung des elektrischen Feldes bzw. die Polarität der Spannung gemessen wird.

7. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß das inhomogene Magnetfeld mit Hilfe eines an einer Festkörperkante (12) außerhalb des Festkörpers (1) positionierten, externen Ferromagneten (4) erzeugt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der ferromagnetische Kontaktkörper (2) oder der externe Ferromagnet (4) als Informationsträger bzw. Magnetspeicher magnetisiert wird.

9. Vorrichtung zum Durchführen des Verfahrens nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß an dem Festkörper (1) mindestens ein die spinpolarisierten Elektronen (8) injizierender ferromagnetischer Kontaktkörper (2), mindestens ein das inhomogene Magnetfeld erzeugender Ferromagnet und mindestens ein elektrischer Kontakt (4) zum Erfassen des elektrischen Feldes vorgesehen sind.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß der die spinpolarisierten Elektronen (8) injizierende ferromagnetische Kontaktkörper (2) und ein zweiter Kontaktkörper (3) zum Anlegen einer elektrischen Spannung für die Elektroneninjektion an gegenüberliegenden Kanten (10, 11) des Festkörpers (1) angeordnet sind.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Kontaktkörper (2, 3) ferromagnetisch sind und zugleich oder wahlweise als magnetisierbarer Informationsträger bzw. Magnetspeicher dienen.

12. Vorrichtung nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, daß an gegenüberliegenden Kanten (12, 13) des Festkörpers (1) auf einer Linie im wesentlichen quer zur mittleren Stromrichtung (6) der spinpolarisierten Elektronen (8) je ein elektrischer Kontakt (4, 5) zum Erfassen des elektrischen Feldes vorgesehen ist.

13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens einer der elektrischen Kontakte (4, 5) einen externen Ferromagneten zum Erzeugen jeweils eines inhomogenen Magnetfelds im Festkörper (1) darstellt oder enthält.

14. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß als Ferromagnet ein den Miniaturisie-

rungsmaßstäben der Magnetspeichertechnologie entsprechend kleines ferromagnetisches Partikel, vorzugsweise unter 500 nm, insbesondere unter 200 nm, Durchmesser, vorgesehen ist.

15. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 9 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß der jeweilige externe Ferromagnet durch eine relativ zu den Festkörpermaterialien dünne Schutz- bzw. Metallschicht (17) von dem Festkörper (1) getrennt ist.

16. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 9 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß eine Verkettung mehrerer Festkörper (1) mit Kontakten (2, 3, 4, 5) und zugehörigen Ferromagneten vorgesehen ist, wobei jeweils ein und derselbe externe Ferromagnet bzw. elektrische Kontakt zum Erzeugen des inhomogenen Magnetfeldes und zum Messen des elektrischen Feldes in zwei benachbarten Festkörpern vorgesehen sind.

17. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 9 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß eine Verkettung mehrerer Festkörper (1) mit Kontakten (2, 3, 4, 5) und zugehörigen Ferromagneten vorgesehen ist, wobei jeder Kontakt von je zwei Elementen genutzt ist und jedes Element im Schnitt nur zwei Kontakte hat und wobei der Injektorkontakt des jeweils einen Elements dem anderen unabhängig von der Magnetisierung als Kontakt zum Anlegen der Injektionsspannung dient (Fig. 8).

18. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 9 bis 17 und 22 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Bereiche bzw. Kontakte zum Erzeugen des inhomogenen Magnetfeldes so dünn sind, daß Magnetfeld und Magnetfeldgradient an der Festkörperoberfläche nahezu parallel zu dieser verlaufen (Fig. 7).

19. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 9 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß ein jeweils als Quelle der spinpolarisierten Elektronen (8) dienender ferromagnetischer Kontaktkörper (2) aus im Sinne einer leichten Unmagnetisierbarkeit weichtferromagnetischem Material besteht.

20. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 9 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß der jeweils zum Erzeugen des inhomogenen Magnetfeldes dienende Ferromagnet (4) aus einem möglichst hartmagnetischen Material besteht.

21. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 9 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß der Festkörper (1) im wesentlichen aus einem Halbleitermaterial, vorzugsweise aus Silizium, besteht.

22. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 9 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß eine planare Anordnung des Festkörpers (1) mit den Kontakten (2, 3, 4, 5) vorgesehen ist (Fig. 6).

23. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 9 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß sich die Kontakte (2, 3, 4, 5) und Ferromagneten auf der Oberfläche der planaren Anordnung befinden (Fig. 1).

24. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 9 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß ein durch Ionenimplantation erzeugtes aktives Gebiet als Festkörper (1) vorgesehen ist.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

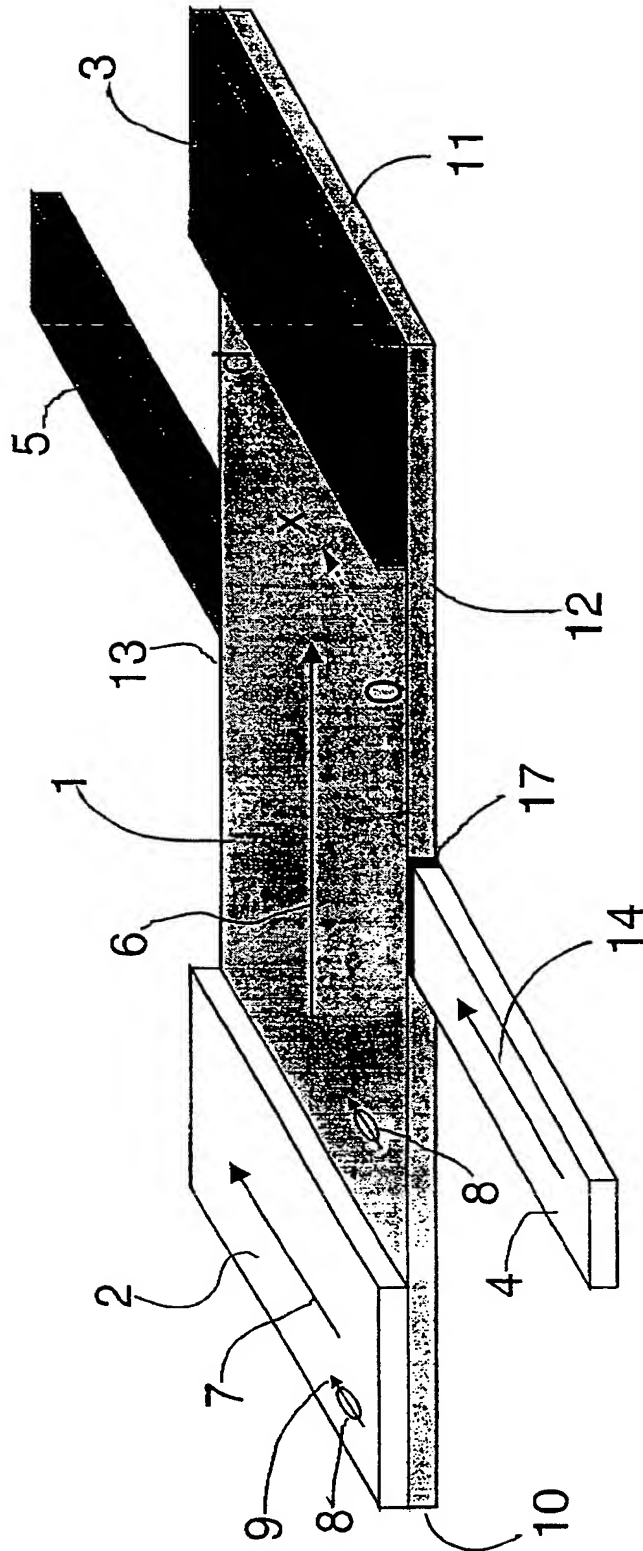


Fig. 1

BEST AVAILABLE COPY

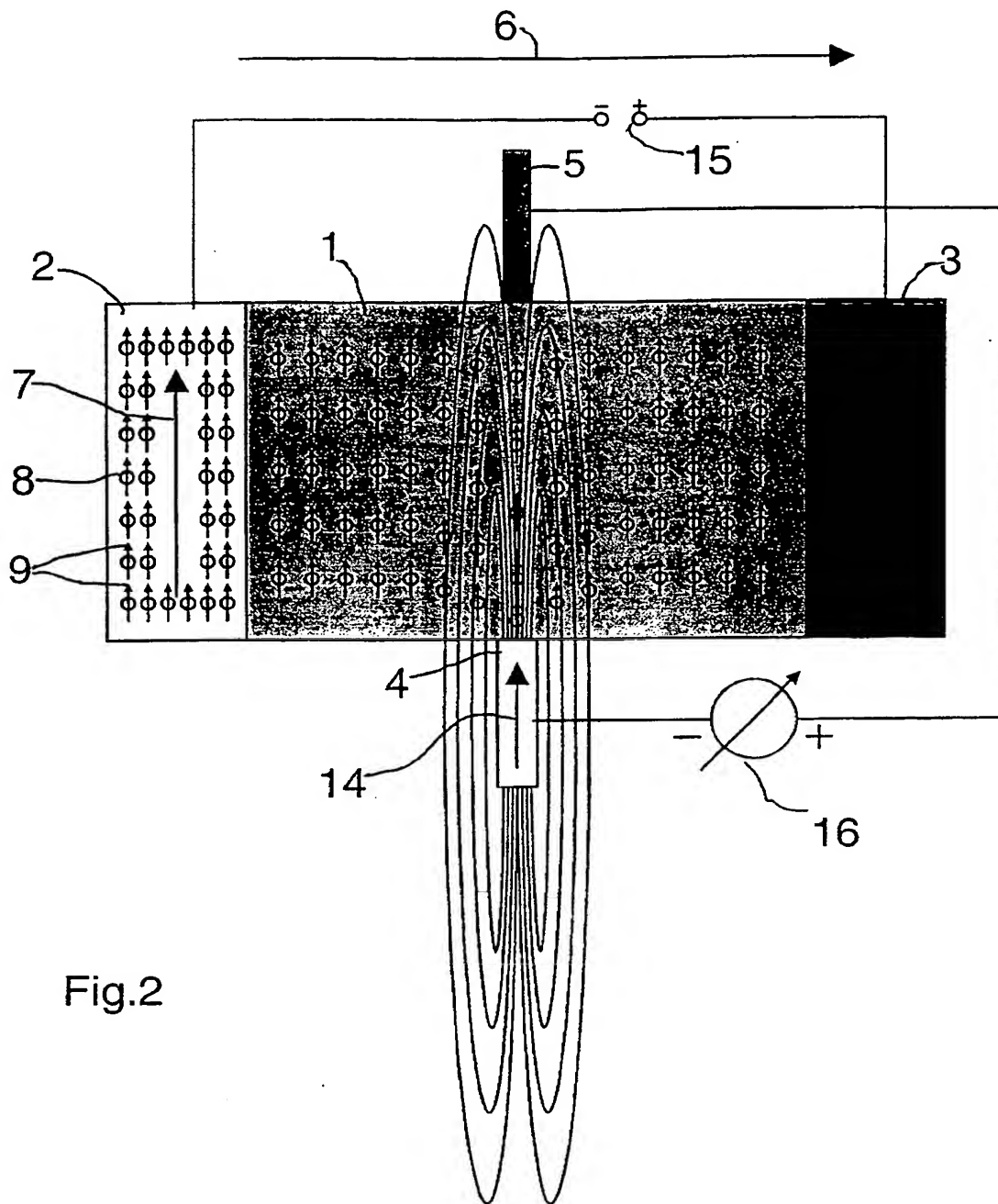


Fig.2

BEST AVAILABLE COPY

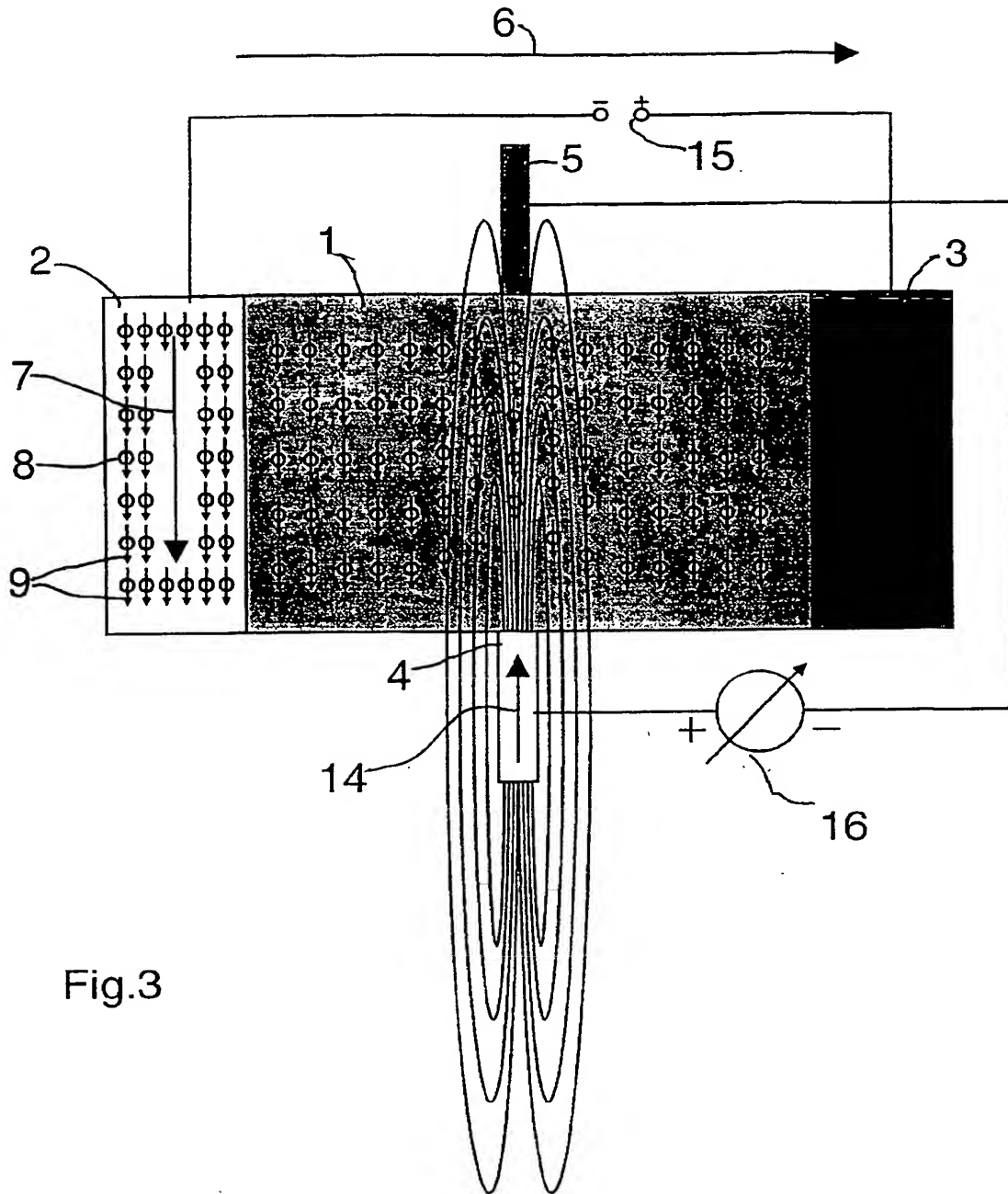


Fig.3

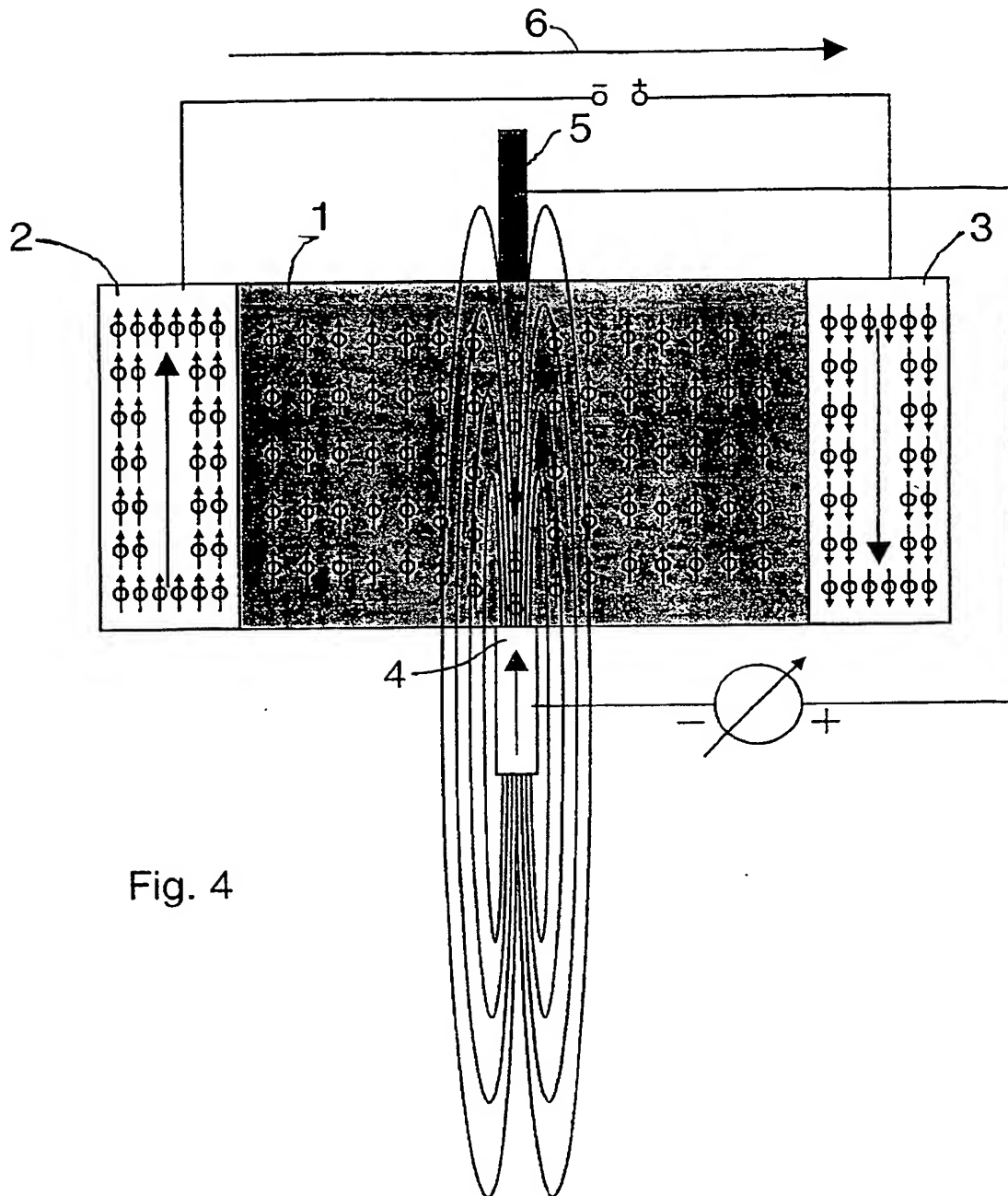


Fig. 4

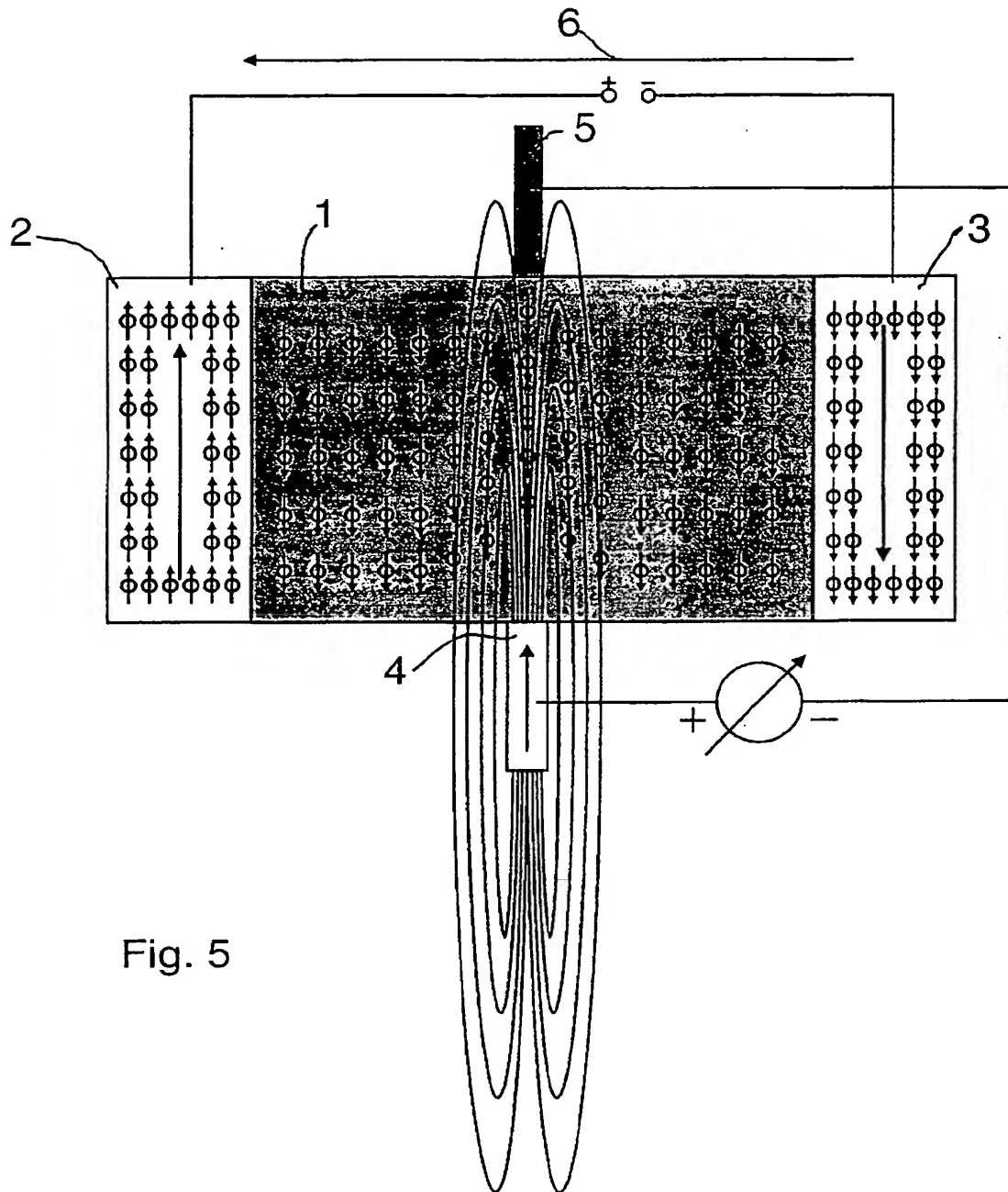


Fig. 5

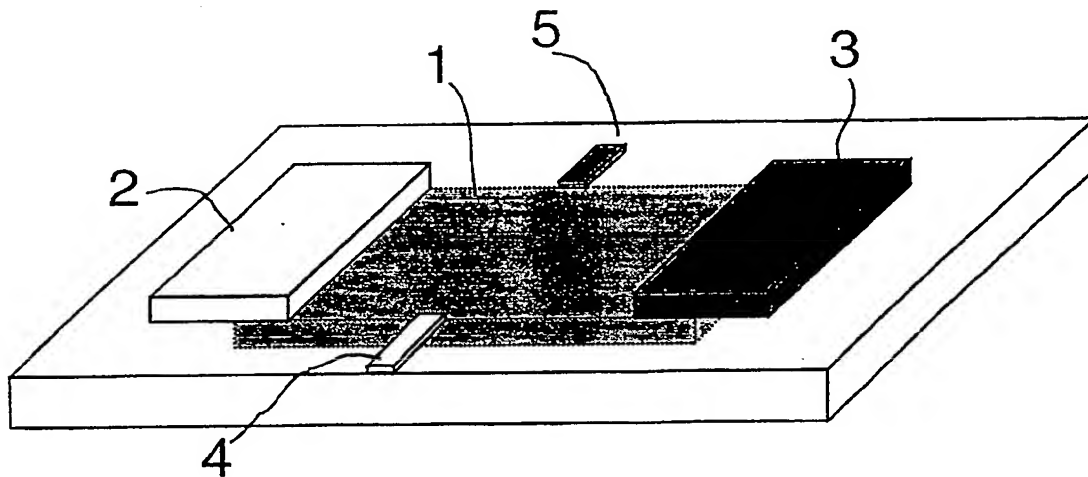


Fig. 6

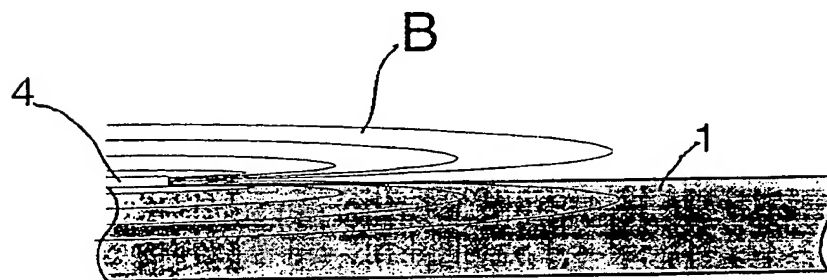


Fig. 7

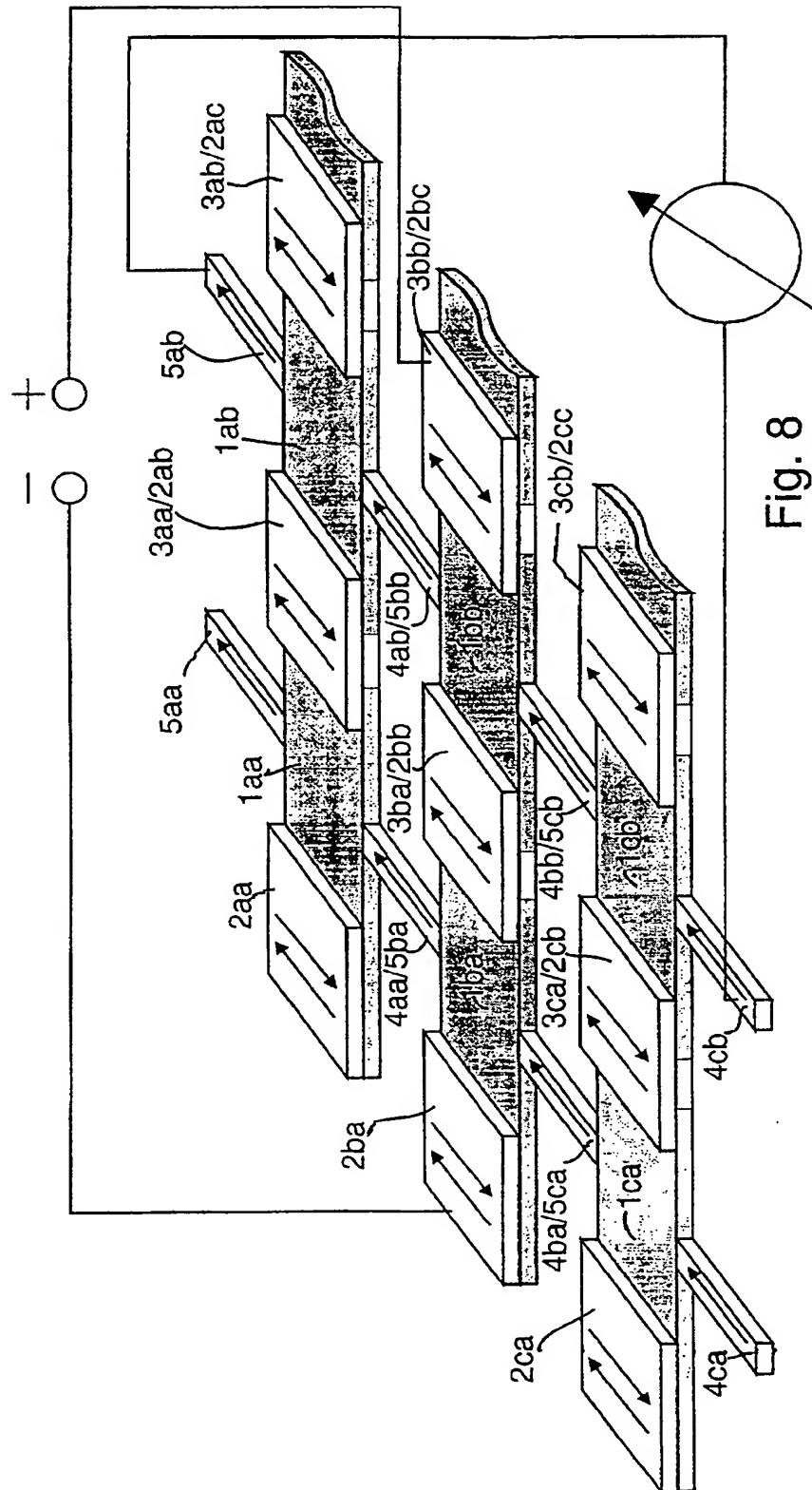


Fig. 8

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☒ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.